

УДК 502.5:661.21

doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ БИОДЕСУЛЬФУРИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОСФОГИПСА

Е. Ю. ЧЕРНЫШ, Е. Н. ЯХНЕНКО*

Кафедра прикладной экологии, Сумской государственный университет, Сумы, УКРАИНА
*email: o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua

АННОТАЦИЯ Описаны результаты экспериментальных исследований режимных параметров работы биофильтра и проведена их оптимизация для повышения эффективности биологического удаления высоких концентраций сероводорода из газового потока в процессе иммобилизации сульфидоокисляющих бактерий на минеральном носителе из фосфогипса. Влияние времени удержания и значения pH системы на эффективность очистки газового потока от сероводорода были аппроксимированы уравнениями регрессии, также был определен режим промывки биофильтра для удаления элементарной серы как продукта газоочистки.

Ключевые слова: биологическая очистка, серосодержащие газовые потоки, сульфидоокисляющие бактерии, минеральный носитель, фосфогипс

DETERMINATION OF REGIME PARAMETERS OF HEAVY LOADED OF BIO- DESULFURIZATION SYSTEM WITH PHOSPHOGYPSUM USING

E. CHERNISH, E. YAKHNENKO

Department of applied ecology, Sumy state University (SSU), Sumy, UKRAINE

ABSTRACT This paper focuses on the study the possibility of phosphogypsum utilization in the bio-desulfurization system for hydrogen sulfide removal from gases flows with high hydrogen sulfide concentration (10%, 20% and 30% of the gas total volume). The optimal parameters of the process of granulation dihydrate phosphogypsum were determined. The depending of the gas cleaning efficiency under immobilization of the thiobacillus on the surface support medium was analyzed from such regime parameters as residence time and pH of system. The main optimal parameters of the gas cleaning process were determined. The degree of H₂S removal (10% w/w) from a gas stream was 99,8% at pH=5,0 and optimum empty bed residence time of 10 h. With increasing H₂S content to 30% of the gas total volume the purification efficiency decreases to 97.6% at other equal conditions. The possibility of the phosphogypsum using as a new type of mineral support medium for the associations of sulfide-oxidizing bacteria developing was determined in the process of biological gases purification from sulfur compounds. Bacterial desulphurization of H₂S increases with increase of residence time (10 h.) and then declines at 15 h. This was due to the accumulation of metabolic products of bacteria. The period of lag phase of growth Thiobacillus sp. initially depended on the concentration of H₂S in the system. Further lowering the pH to 4,0 did not lead to an increase in the degree of hydrogen sulfide removal. Effects of residence time and pH on the efficient of hydrogen sulfide removal were approximated regression equations. The biofilter washing mode to remove elemental sulfur was also determined.

Keywords: biological purification, sulfur-containing gases flows, sulfide-oxidizing bacteria, mineral carrier, phosphogypsum

Введение

Современной общемировой проблемой является образование отходов промышленной переработки природного сырья и пополнение их отходов, что угрожает устойчивому функционированию природных экосистем разного уровня и представляет угрозу вторичного загрязнения окружающей среды.

Большое количество отходов в виде фосфогипса образуется при производстве экстракционной фосфорной кислоты. Так, ежегодные объемы его накопления в мире составляют до 130 млн. т. [1], по современным данным на территории Украины уже накоплено больше 90 млн. тонн [2], а на территории Сумской области – свыше 14 млн. т

фосфогипса, причем ежегодно в области его образуется около 100 тыс. т. [3].

Хранение и утилизация фосфогипсовых отходов является актуальной и нерешенной проблемой, что связано не только с отчуждением земель под хранение отвала, но и с воздействием на прилегающие территории из-за пыления, испарения в атмосферу, воздействие на почвы прилегающих ландшафтов. Так, негативное воздействие отходов фосфогипса, особенно «свежей очереди», может проявляться в загрязнении подземных и поверхностных вод, почвенно-растительного покрова токсичными веществами в результате их испарения и вымывания из стенок отвала атмосферными осадками, при попадании в атмосферу под действием выветривания и пыления. Отвал может стать

источником гидродинамического воздействия на окружающую среду, вызывая изменение уровня подземных вод, что может приводить к отрицательным явлениям в близлежащей селитебной зоне, происходит отчуждение и загрязнение значительных площадей земельных участков, трансформация природного ландшафта [4 - 6].

Существуют различные способы возможной утилизации фосфогипсовых отходов, что делает возможным уменьшение негативного воздействия на ОС [7, 8]. Достаточно новыми среди них являются способы использования фосфогипса в технологиях защиты окружающей среды. Так, разработанным перспективным направлением с использованием фосфогипса является переработка осадков сточных вод в системах анаэробной микробиологической деградации с осаждением тяжелых металлов биогенным сероводородом – продуктом жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий, где гранулированный фосфогипс выступает иммобилизационным субстратом для бактериальной культуры [9].

Одним из возможных способов утилизации фосфогипсовых отходов является использование в технологиях биоочистки газовых потоков от соединений серы с помощью ассоциации сероокисляющих микроорганизмов. При этом использование тиобактерий как субстрата компонентов фосфогипса приводит к формированию стойкой биопленки, что было изучено в [10].

К серосодержащим газовым потокам относятся все газы нефтепереработки (крекинга, риформинга, гидроочистки и т. д.), генераторный, сланцевой переработки, коксовый и природный. Сероводород присутствует также в биогазе, который образуется в процессе анаэробного сбраживания органических отходов. Биологической очистки могут поддаваться газовые потоки различного происхождения [11 - 13]. Однако большинство систем биодесульфуризации используется для очистки газовых потоков с содержанием сероводорода начиная от 25 до 750 ppm [11 - 14], что ограничивает возможные направления использования систем биологической газоочистки.

Сероводород, который может содержаться в газовых потоках в разных количествах и, как следствие, замедлять или останавливать каталитические процессы, в результате биоочистки выводится из технологической схемы и может быть переработан в товарный продукт – элементарную серу. Также извлечение сероводорода или иных серосодержащих соединений уменьшает возможность попадания данных веществ в атмосферу и способствует уменьшению негативного техногенного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, актуальным является разработка экологически безопасного направления использования фосфогипса в высоконагруженных системах биологической газоочистки.

Цель работы

Целью данной работы является изучение зависимости процесса биологического удаления высоких концентраций сероводорода из газового потока от ряда режимных параметров в процессе иммобилизации тиобактерий на минеральном носителе из фосфогипса. Задания, на решение которых направлена работа:

- экспериментальное исследование зависимости степени эффективности газоочистки от концентрации сероводорода в газовой смеси, времени удержания газовой смеси в биофильтре и значения pH системы;
- построение регрессионной модели процесса биологической газоочистки;
- оптимизация процесса промывки биофильтра для удаления элементарной серы из поверхности гранул фосфогипса.

Изложение основного материала

Экспериментальное моделирование процесса биологической газоочистки с применением минеральной загрузки на основе фосфогипса. Лабораторные эксперименты проводились в биофильтре (рис.1), представляющем собой колонну из оргстекла (1) с гранулированной минеральной загрузкой (2), изготовленной из дигидратного фосфогипса, которую предварительно инокулировали биомассой сульфидокисляющих бактерий (*Thiobacillus sp.*), выделенной в накопительную культуру из активного ила.

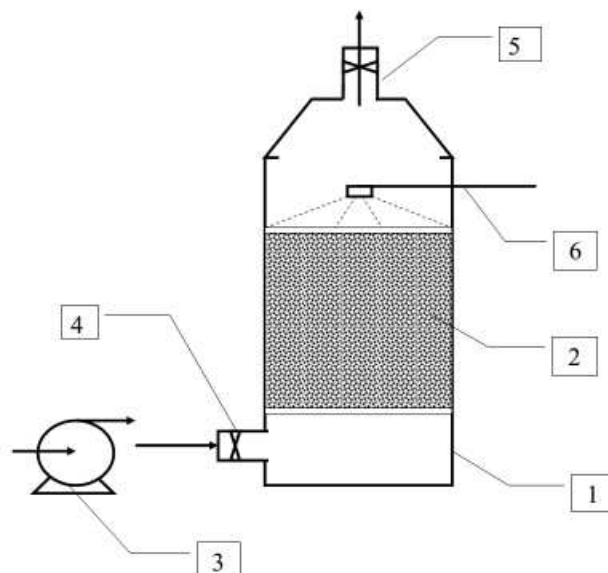


Рис. 1 – Экспериментальная лабораторная установка: 1 – колонна из оргстекла; 2 – гранулированная загрузка из фосфогипса; 3 – компрессор; 4 – штуцер для подачи газовой смеси; 5 – штуцер для отвода очищенного газа; 6 – ороситель спринклерный

При исследовании степени удаления сероводорода газовую смесь известного состава (содержащую не менее 10% H_2S по объему) нагнетали компрессором (3) в нижнюю часть колонны через штуцер (4). В верхней части колоны был расположен штуцер (5) для отведения газа, который прошел очистку, и отбора проб для анализа. Для орошения в биофилтре использовали ороситель спринклерный (6) для подачи водопроводной воды.

Проводилось измерение концентрации H_2S на выходе из биофилтра через регулярные промежутки времени (5, 10, 15 ч.), также осуществлялся контроль физико-химических характеристик гранулированной загрузки из фосфогипса (рН и влажность). Биогазоочистка проводилась в мезофильном режиме (303К).

Исследования газовой фазы проводились на лабораторном газовом хроматографе СЭЛМИХРОМ-1 (Сумы, Украина). Были использованы три последовательно подключенные колонки: предварительная PLOT колонка с «PorapLOT Q»; балластная колонка с «Хроматон N-AW-DMCS»; HP-PLOT колонка с молекулярным ситом Mole Sieve. В качестве газа-носителя был использован аргон, скорость потока 25 см³/мин. Был применен детектор теплопроводности (катарометр). Для градуировки и определения времени удерживания газа использовалась аттестованная поверочная газовая смесь (ПГС) (ТУ 24.1-025681820016200): Ar-CO₂-H₂S (40-30-30%); Ar-CO₂-H₂S (50-30-20%); Ar-CO₂-H₂S (60-30-10%); Ar-CH₄-H₂S (35-45-20%).

Вариацией длины колонки, температурного режима и скорости газа-носителя были выбраны такие условия анализа:

- предварительная PLOT-колонка 1 – внутренний диаметр 0,32-мм, длина 10 м;
- сорбент «PorapLOT Q» – 10⁻³ мм;
- колонка 2 – внутренний диаметр 3-мм, длина 5 м;
- сорбент «Хроматон N-AW-DMCS» – 0,20–0,25 мм;
- HP-PLOT-колонка 3 – внутренний диаметр 0,32 мм, длина 10 м;
- молекулярные сита Mole Sieve – 4·10⁻⁷ мм;
- температура колонок – 333 К;
- ток моста – 220·10⁻³ А.

Определение экстремумов функции $M(Y)$ в области переменных режимных параметров $X(f)$ процесса удаления сероводорода из газовой смеси. Математическое ожидание критерия оптимизации Y является функцией от вектора X входных управляемых переменных (факторов варьирования):

$$M(Y) = f(\bar{X}) = f(X_1; X_2; \dots; X_n), \quad (1)$$

где n – число факторов, то задача сводится к поиску таких значений факторов

$\bar{X}^* = f(X_1^*; X_2^*; \dots; X_n^*)$, при которых целевая функция достигает экстремума.

Таким образом, математическое ожидание можно подать регрессионным уравнением вида

$$M(Y) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2 + a_4X_2^2 + a_5X_1X_2 + \dots, \quad (2)$$

где a_0, a_1, a_2, \dots – коэффициенты регрессии при соответствующих переменных.

В качестве критерия отклика было взято наибольшее значение Y_1 , что соответствует максимальной эффективности удаления сероводорода из газового потока.

Статистическая обработка результатов осуществлялась в программе MS Excel. Математическая обработка результатов экспериментов проводилась с помощью пакета программы Statistica 6.0.

Обсуждение результатов

При определении оптимальных сочетаний таких факторов, как время удержания (X_1) и значение рН (X_2), была построена диаграмма трехмерной поверхности (рис. 2), которая объединяет набор значений данных по сериям экспериментов с варьированием значений рН в диапазоне от 4,0 до 6,5 с интервалом 0,5 ед. при содержании сероводорода в газовой смеси 20%.

Влияние времени удержания (X_1) и значения рН (X_2) на эффективность очистки газового потока от сероводорода (Y) аппроксимируется следующими уравнениями регрессии для разных концентраций сероводорода в газовой смеси:

– при содержании сероводорода 30% от общего объема газовой смеси

$$M(Y_1) = -360,45 + 36,05X_1 + 102,55X_2 - 1,46X_1^2 - 10,38X_2^2; \quad (3)$$

коэффициент детерминации составил 0,9678, стандартная ошибка оценки – 0,1780;

– при содержании сероводорода 20%

$$M(Y_1) = -310,83 + 36,95X_1 + 80,11X_2 - 1,52X_1^2 - 8,15X_2^2; \quad (4)$$

коэффициент детерминации составил 0,9641, стандартная ошибка оценки – 0,1920;

– при содержании сероводорода 10%

$$M(Y_1) = -279,17 + 35,59X_1 + 69,47X_2 - 1,44X_1^2 - 7,17X_2^2. \quad (5)$$

коэффициент детерминации составил 0,9745, стандартная ошибка оценки – 0,1890;

С увеличением времени удержания (X_1) газовой смеси в пространстве биофилтра происходит увеличение эффективности конверсии сероводорода в соответствии с регрессионными уравнениями (3-5) с первоначальной лаг-фазой в течении 5 первых часов (рис. 2) и стабилизацией оптимальной степени очистки на 10–12 часов.

Наименьшая степень очистки газового потока происходит при значениях рН=6,5 и в среднем составляет 65 % при содержании сероводорода 30% от объема газового потока.

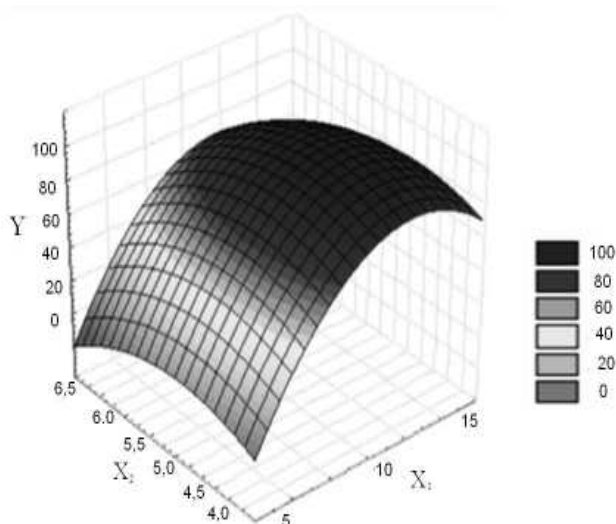


Рис. 2 – Зависимость эффективности удаления сероводорода (Y_1) от времени удержания (X_1) газовой смеси и pH раствора в биофильтре (X_2)

Наиболее высокая эффективность биоочистки (99,8%) газовой смеси достигается при концентрации в нем H_2S 10% при pH=5 и времени удержания газовой фазы в биофильтре 10 часов (рис. 2). С увеличением содержания H_2S до 30% эффективность очистки снижается до 97,6 % при других одинаковых условиях.

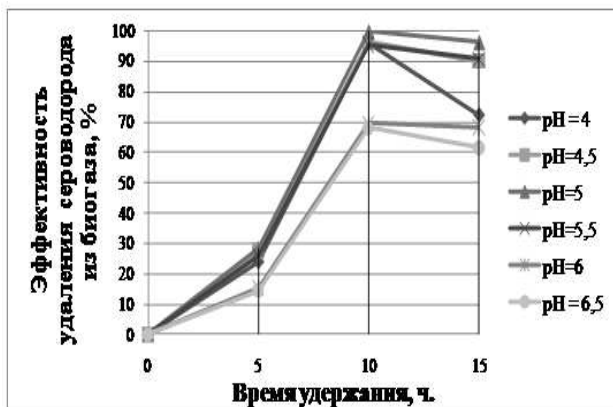


Рис. 3 – Зависимость степени удаления сероводорода из газового потока в биофильтре от времени удержания при разных значениях pH

Таким образом, для оптимального развития ацидофильной ассоциации видов сульфидокисляющих бактерий значение pH должно находиться в пределах от 4,5 до 5. Как видно из рис. 3 в течении первых пяти часов бактерии адаптируются к условиям среды биофильтра (лаг фаза), начинают постепенно поглощать сероводород, преобразуя его в серу (степень удаления H_2S до 30%). Затем следующие 5 часов происходит наращивание биомассы на поверхности гранул фосфогипса с

образованием стойкой биопленки, что усиливает потребность бактерий в веществах и энергии, и способствует максимально эффективной газоочистке (97-99,8%). Снижение эффективности очистки до 93-87% после 10 часов удержания в биофильтре газовой смеси объясняется накоплением метаболитов в виде серы на поверхности самих бактериальных клеток и минеральном субстрате (гранулах фосфогипса).

Периодичность удаления с поверхности фосфогипсовых гранул серы соответствует длительности периода удержания растворимых примесей до их полной конверсии. Так, при прохождении объема газа через минеральную загрузку растворенный сероводород задерживается в биофильтре на время (X_1) до полной конверсии и этот промежуток времени и является периодом накопления серы на гранулах, после прохождения которого она удаляется. Для извлечения элементарной серы осуществляли промывку биофильтра проточной водопроводной водой, которая подавалась из оросительной системы в верхней части биофильтра в течении определенного времени (X_3). Организация удаления серы может проводиться без остановки подачи газового потока на очистку.

Для процесса газоочистки важным является организация рационального процесса промывки биофильтра для удаления элементарной серы с поверхности гранул фосфогипса. Зависимость концентрации серы в водном растворе от продолжительности промывки приведены на рис. 4 при очистке газовой смеси, содержащей 20% H_2S .

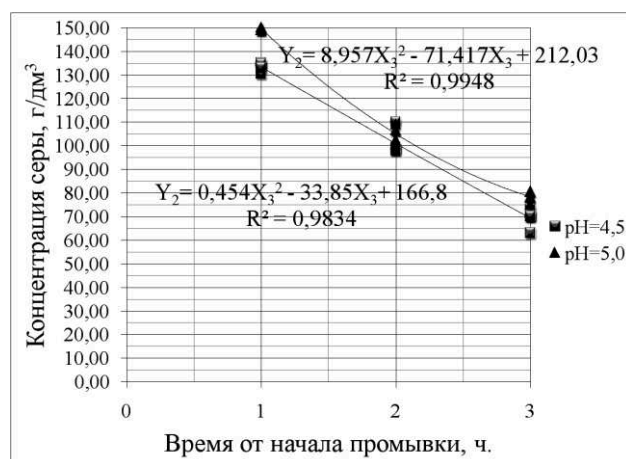


Рис. 4 – Зависимость концентрации серы (Y_2), которая удаляется из биофильтра, от времени промывки биофильтра (X_3) при разных значениях pH системы

Следует отметить, что при удалении серы в первый час промывки уходит основная ее часть, при этом максимальный выход элементарной серы достигает 149 г на 1 $дм^3$ водного раствора. За последующие периоды промывки количество извлеченной серы уменьшается по массе и достигает

99 г/дм³ (через 2 часа) и 70 г/дм³ (через 3 часа), т.е. прослеживается нелинейный закон вымывания серы.

Отметим, что использование вторичного сырья для производства минерального носителя в биофилтре имеет такие преимущества как легко доступность и дешевизна. Высокое содержание концентрацией питательных веществ являются дополнительным преимуществом использования гранулированного фосфогипса как носителя, что и стимулирует метаболическую продуктивность системы по выходу элементарной серы и достижение показателей эффективности биоочистки от высоких концентраций сероводорода не менее 97% при оптимальном сочетании режимных параметров работы биофильтра.

Выводы

В работе рассмотрена возможность биоочистки газовых потоков при высоких концентрациях сероводорода (от 10 до 30%). При этом для иммобилизации сульфидокисляющих бактерий использовался минеральный носитель из дигидратного фосфогипса, что обеспечивает увеличение резистентности нужных экологотрофических групп бактерий к токсическому действию высоких концентраций сероводорода. Об этом свидетельствует высокая степень очистки модельных газовых смесей и высокий уровень накопления метаболита тиобактерий (элементарной серы) на поверхности фосфогипсовых гранул.

Список литературы

1. Лотош, В. Е. Переработка отходов природопользования / В. Е. Лотош // *Екатеринбург: изд-во УрГУПС*. – 2002. – 463 с.
2. Кожушко, В. П. Гидрофобизация изделий из гипсовых вяжущих – одно из направлений расширения сферы их применения в строительстве / В. П. Кожушко // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2005. – № 29. – С. 83-86.
3. Мирка, Г. Е. Проблемы утилизации техногенных отходов промышленных предприятий Сумской области / Г. Е. Мирка, Н. Г. Рудой // *Материалы 3-ей Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов»*. – 2006. – С. 101-102.
4. Наркевич, И. П. Утилизация и ликвидация отходов в технологии неорганических веществ / И. П. Наркевич, В. В. Печковский // М.: Химия. – 1984. – 240 с.
5. Петренко, Д. В. Влияние производства фосфорных удобрений на содержание стронция в ландшафтах: автореф. дис. на соискания наук. степени канд.биол.наук: спец. 03.02.08 – «Экология» / Д. В. Петренко. – Москва. – 2014. – 15 с.
6. Degirmenci, N. Application of phosphogypsum in soil stabilization / N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi // *Building and Environment*. – 2007. – № 42 (9). – P. 3393-3398. – doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.010
7. Papastefanou, C. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact / C. Papastefanou, S. Stoulos, A. Ioannidou, M. Manolopoulou // *Journal of*

- Environmental Radioactivity*. – 2006. – №89 (2). – P. 188-198. – doi:10.1016/j.jenvrad.2006.05.005.
8. Shen Weiguo Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material / Shen Weiguo, Zhou Ming kai, Ma Wei, Hu Jinqiang, Cai Zhi // *Journal of hazardous materials*. – 2009. – 164(1). – P. 99-104. – doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.125.
9. Plyatsuk, L. D. Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge and gypsum waste under bio-sulfidogenic conditions / L. D. Plyatsuk, E. Yu. Chernish // *The Journal of Solid Waste Technology and Management (USA)*. – 2014. – Vol. 40, no 1. – P. 10-23. – doi:10.5276/JSWTM.2014.10.
10. Черныш, Е. Ю. Адсорбционная иммобилизация сульфидокисляющих бактерий в массе носителя, изготовленного из фосфогипса / Е. Ю. Черныш, Л. Д. Пляцук // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. – №3/4 (23). – С. 4-7. – doi:10.15587/2312-8372.2015.42046.
11. Park, Byoung-Gi C. Simultaneous Biofiltration of H₂S, NH₃ and Toluene using an Inorganic/Polymeric Composite / C. Byoung-Gi Park, Won S. Shin, J. S. Chung // *Environ. Eng. Res.* – 2008. – Vol. 13, no. 1. – P. 19-27. – doi:10.4491/eer.2008.13.1.019.
12. Ramirez, M. Removal of hydrogen sulphide by immobilized Thiobacillus thioarparus in a biofilter packed with polyurethane foam / M. Ramirez, J. M Gómez, D. Cantero // *Bioresource Technology*. – 2009. – Volume 100, Issue 21. – P. 4989-4995.
13. Janssen, A. J. Performance of a sulfide oxidizing expanded bed reactor supplied with dissolved oxygen / A. J. Janssen, S. C. Ma, P. Lens, G. Lettinga // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1997. – № 53(1). – P. 32-40. doi:10.1002/(SICI)1097-0290(19970105)53:1<32::AID-BIT6>3.0.CO;2-#.
14. Пат. Европейский № EP 0845288 A1, МПК B01D53/48, C12S5/00, C10L3/10, B01D53/84 Process for biological removal of sulphide. Cees Jan Nico Buisman, Albert Jozef Hendrik Janssen; Thiopaq Sulfur Systems B.V. – № EP19960203347; заявл. 27. 11.1996; опубл. 3. 06.1998.

Bibliography (transliterated)

1. Lotosh, V. E. Recycling wildlife [Recycling waste wildlife], *Yekaterinburg: Published of USURT*, 2002, 463 p.
2. Kozhushko, V. P. Hydrophobisation of articles from gypsum binders is one of the expansion of their using in construction [Waterproofing of articles from gypsum binders - one of the areas of expanding the scope of their application in construction]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University]*, 2005, 29, 83-86.
3. Mirka, G. E., Rudoi, N. G. Problemy utilizatsii tekhnogennykh otkhodov promyshlennykh predpriyatiy Sumskoy oblasti [Problems of utilization of technogenic waste of the industrial enterprises of the Omsk region], *Proceedings of the 3rd International Conference "Cooperation for Waste Issues"*, 2006, 101-102.
4. Narkevich, I. P. Utilizatsiya i likvidatsiya otkhodov v tekhnologii neorganicheskikh veshchestv [Recycling and waste disposal in the technology of inorganic substances], Moscow: Ximiya, 1984, 240 p.

5. **Petrenko, D. V.** Vliyanie proizvodstva fosfornykh udobreniy na sodержanie strontsiya v landshaftakh [Effect of phosphate fertilizer on the strontium content of the landscapes]: Abstract. *Dis. on competition sciences. degree kand.biol.nauk: spec.* 03.02.08 - Ecology, Moscow, 2014.
6. **Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A.** Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and Environment*, 2007, **42**(9), 3393-3398, doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.010.
7. **Papastefanou, C., Stoulos, S., Ioannidou, A. and Manolopoulou M.** The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, **89** (2), 188-198, doi:10.1016/j.jenvrad.2006.05.005.
8. **Shen, Weiguo, Zhou, Ming kai, Ma, Wei, Hu, Jinqiang and Cai, Zhi** Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material, *Journal of hazardous materials*, 2009, **164**(1), 99-104, doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.125.
9. **Plyatsuk, L. D. Chernish E. Yu** Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge and gypsum waste under bio-sulfidogenic conditions, *The Journal of Solid Waste Technology and Management (USA)*, 2014, **40**(1), 10-23, doi:10.5276/JSWTM.2014.10.
10. **Chernish, E., Plyatsuk, L.** Adsorbtsionnaya immobilizatsiya sulfidokislyayushchikh bakteriy v masse nositelya, izgotovlennogo iz fosfogipsa [Adsorption immobilization of sulfide-oxidizing bacteria in the mass of the support medium made of phosphogypsum], *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva [Technology audit and production reserves]*, 2015, **3/4**(23), 4-7, doi:10.15587/2312-8372.2015.42046
11. **Park, Byoung-Gi C., Shin, Won S., Chung, J. S.** Simultaneous biofiltration of H₂S, NH₃ and toluene using an inorganic polymeric composite, *Environ. Eng. Res.*, 2008, **13**(1), 19-27, doi:10.4491/eer.2008.13.1.019.
12. **Ramirez, M., Gómez, J., Cantero, D.** Removal of hydrogen sulphide by immobilized *Thiobacillus thioautotrophicus* in a biofilter packed with polyurethane foam, *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21), 4989-4995.
13. **Janssen, A. J., Ma, S. C., Lens, P., Lettinga, G.** Performance of a sulfide oxidizing expanded bed reactor supplied with dissolved oxygen, *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, **53**(1), 32-40. doi:10.1002/(SICI)1097-0290(19970105)53:1<32::AID-BIT6>3.0.CO;2-#.
14. **European patent № EP 0845288 A1** Process for biological removal of sulphide / Cees Jan Nico, Buisman and Albert Jozef Hendrik, Janssen // applicant and recipient patent *Thiopaq Sulfur Systems B.V.*, 1998.

Сведения об авторах (About authors)

Черныш Елизавета Юрьевна – кандидат технических наук, Сумской государственный университет (СумГУ), старший преподаватель кафедры прикладной экологии Сумского государственного университета, г. Сумы, Украина; e-mail: e.ur.chernish@gmail.com

Chernish Elizaveta Yuriyevna – Candidate of Technical Sciences, senior lecturer in Department of Applied Ecology, Sumy State University (SSU), Sumy, Ukraine, 40007; e-mail: e.ur.chernish@gmail.com

Яхненко Елена Николаевна – ассистент кафедры прикладной экологии Сумского государственного университета, Сумской государственный университет (СумГУ), г. Сумы, Украина; e-mail: o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua

Yakhnenko Elena Nikolaevna – assistant in Department of Applied Ecology, Sumy State University (SSU), Sumy, Ukraine, 40007; e-mail: o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Черныш, Е. Ю. Определение режимных параметров работы высоконагруженных систем биодесульфуризации с применением фосфогипса / **Е. Ю. Черныш, Е. Н. Яхненко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 207-212. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31.

Please cite this article as:

Chernish, E., Yakhnenko, E. Determination of regime parameters of heavy loaded of bio-desulfurization system with phosphogypsum using. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12** (1184), 207-212, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Черныш, Е. Ю. Визначення режимних параметрів роботи високонавантажених систем біодесульфуризації з використанням фосфогіпсу / **Є. Ю. Черныш, О. М. Яхненко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 207-212. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31.

АНОТАЦІЯ Здійснено опис результатів експериментальних досліджень режимних параметрів роботи біофільтра і проведена їх оптимізація для підвищення ефективності біологічного видалення високих концентрацій сірководню з газового потоку в процесі іммобілізації сульфідокислюючих бактерій на мінеральному носії із фосфогіпсу. Вплив часу утримання і значення рН системи на ефективність очищення газового потоку від сірководню були апроксимовані рівняннями регресії, також було визначено режим промивання біофільтра для видалення елементарної сірки як продукту газоочищення.

Ключові слова: біологічне очищення, сірководнісі газові потоки, сульфідокислюючі бактерії, мінеральний носій, фосфогіпс

Надійшла (received) 10.03.2016